

氏 名	向井 正和
学 位 の 種 類	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博甲第 705 号
学位授与の日付	平成 17 年 3 月 22 日
学位授与の要件	課程博士 (学位規則第 4 条第 1 項)
学位授与の題目	ハイブリッドシステムに対する不変集合を用いたロバストモデル予測制御
論文審査委員(主査)	藤田 政之 (自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副査)	村本 健一郎 (自然科学研究科・教授), 山根 智 (自然科学研究科・教授), 伊藤 俊次 (自然科学研究科・教授), 木村 春彦 (自然科学研究科・教授)

学 位 論 文 要 旨

ハイブリッドシステムに対する不変集合を用いた ロバストモデル予測制御

Robust Model Predictive Control for Hybrid Systems based on Invariant Sets

This paper considers robust model predictive control of constrained piecewise linear systems. Robust model predictive control is implemented by solving a min-max type optimization problem at each time step, in which mixed logical dynamical formulation is employed, with an end set constraint that consists of constrained positively invariant sets. A simple example is presented to show that the control law we propose guarantees convergence to the set and satisfying the constraints for bounded disturbance. Then an off-line control algorithm is proposed to reduce on-line computational time. The control algorithm gives an explicit controller, that is represented by piecewise affine function. If once the piecewise affine function is obtained, when one implements the controller only the region that the state belongs to is necessary for on-line computation. Then this paper also proposes an approximate robust model predictive control algorithm. The control algorithm uses min-max controller and a partition algorithm for the min-max problem is also considered. Furthermore an optimal control for multi-vehicle system is also studied.

1 はじめに

本研究では、ハイブリッドシステムに対する有界な外乱を考慮したモデル予測制御について議論する。ハイブリッドシステム表現として、区分的線形システム表現と論理混合型ハイブリッドシステム表現の二つを用い、この二つのシステム表現の等価性を利用して制御アルゴリズムを構築する。本論文では、外乱に対応するために二つの制御モードを有する制御アルゴリズムを構成する。一つの制御モードは線形の状態フィードバック則、もう一つは最大最小化問題を各ステップで解くモデル予測制御で構成する。この制御アルゴリズムにより有界な外乱が存在しても、状態と入力の拘束を破らないことと、状態が不変集合から構成される集合に収束することを保証することが可能となる。また、オンライン計算の負荷を軽減するために、オフライン計算を利用した制御アルゴリズムを提案する。これにより、制御アルゴリズムが与える制御則は、状態に関して区分的アフィンな形で表現可能となる。さらに、最適化における min-max 制御則の導出についての制御アルゴリズムを提案する。最後に、複数のロボットシステムをハイブリッドシステムとして表現し、その最適制御について議論する。このシステムの制御は上位と下位の制御構造で階層的に行なう。シミュレーションと実

験を行い、複数の制御対象が含まれるハイブリッドシステムの制御方法について明らかにする。

2 システム表現

本論文では、次式 (1) で表わされる外乱の入る離散時間区分的線形システムを扱う (図 1)。ベクトル $w(t) \in W \subset \mathbb{R}^q$ は有界な外乱を表わし、集合 W は凸多面体で原点を含む集合とする。

$$x(t+1) = A^i x(t) + B^i u(t) + B_w w(t), \quad x(t) \in \mathcal{X}_i \quad (1)$$

ここで $x(t) \in \mathbb{R}^n$ は状態、 $u(t) \in \mathbb{R}^m$ は入力を表わす。システムは状態と入力に関する拘束条件を有しているとする。 \mathcal{X}_i は $\mathcal{X}_i \cap \mathcal{X}_j = \emptyset, \forall i \neq j, \cup_{i=1}^s \mathcal{X}_i = \mathbb{X}$ となる状態の集合とする。各領域 \mathcal{X}_i ごとのダイナミクスは、行列 A^i, B^i を用いて表されている。

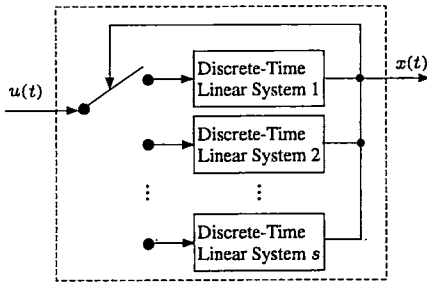


図 1: Piecewise linear system

区分的線形システムと等価な表現として、論理混合型ハイブリッドシステム (MLD システム) が存在する。この表現を用いて区分的線形システム (1) は、論理混合型ハイブリッドシステム (2) として等価に表現することができる。

$$x(t+1) = Ax(t) + B_1 u(t) + B_2 \delta(t) + B_3 z(t) + B_p w(t) \quad (2a)$$

$$E_2 \delta(t) + E_3 z(t) \leq E_1 u(t) + E_4 x(t) + E_5 \quad (2b)$$

本論文では、この二つの等価なシステム表現を用いることで、ロバストモデル予測制御アルゴリズムを構成する。

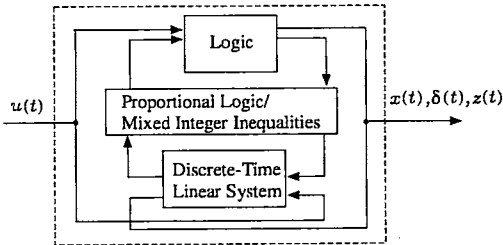


図 2: Mixed Logical Dynamical system

3 ロバストモデル予測制御アルゴリズム

システム表現 (1) に対して、二つのモードの制御則を考える。おおまかには、これらの制御則では、mode-1 は状態を不変集合に保つ役割、mode-2 は終端集合に収束させるという役割をもっている。

mode-1: 区分的線形システム (1) に対し、入力を状態フィードバックの形で $u = K_i x$ とする。

mode-2: 図 3 のように、論理混合型ハイブリッドシステムのモデル予測制御を考える。ここでは、極端な外乱を扱って問題を定式化することで、最適化問題を解くことが可能となる。

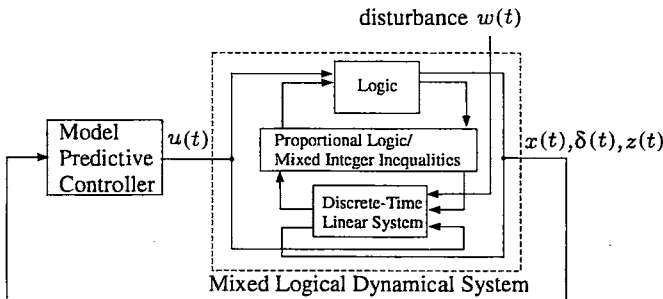


図 3: Control mode-2

終端拘束集合の構成: mode-2 のモデル予測制御問題の終端拘束条件に用いる終端拘束集合は、区分的線形システムのそれぞれのモードに対して、状態フィードバック則を設定し、閉ループ系に対して外乱に対する不変集合 (最大 CPI 集合) $\mathcal{O}_{\infty i}$ を求めて次式 (3) のように構成する。

$$\mathcal{P} := \bigcap_{i=1}^s \mathcal{O}_{\infty i} \quad (3)$$

以上の二つの制御モードを融合することで、制御アルゴリズムを構成する。本論文では、制御モード mode-2 の部分について考察し、オフライン計算を利用した制御アルゴリズムを提案する。また、制御モード mode-2 の部分を min-max 最適化問題に発展させた場合のアルゴリズムも提案する。

4 数値例

つぎの区分的線形システムを考える。

$$x(t+1) = 0.8 \begin{bmatrix} \cos \alpha(t) & -\sin \alpha(t) \\ \sin \alpha(t) & \cos \alpha(t) \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t) \quad (4)$$

$$\alpha(t) = \begin{cases} \pi/3 & \text{if } \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x(t) \geq 0 \\ -\pi/3 & \text{if } \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x(t) < 0 \end{cases}$$

ここで、拘束条件が $x(t) \in [-10, 10] \times [-10, 10]$, $u(t) \in [-2, 2]$ であるとし、外乱は有界で $w(t) \in [-0.2, 0.2]$ とする。それぞれに対する不変集合 $\mathcal{O}_{\infty 1}$, $\mathcal{O}_{\infty 2}$ 計算する。この二つの集合を用いて終端拘束集合を $\mathcal{P} = \mathcal{O}_{\infty 1} \cap \mathcal{O}_{\infty 2}$ と決定する。

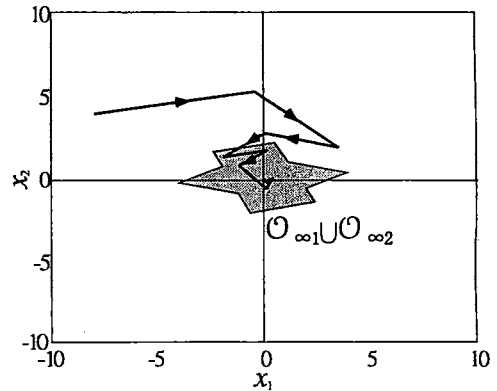


図 4: The state trajectory

いま、初期状態 $x(0) = [-8 \ 4]^T$ 、有界な外乱を $w(t) = 0.2/t$, $t \geq 1$ とし、状態のトラジェクトリーを図4に示す。図4では、実線が状態のトラジェクトリーであり、外乱が存在しても、状態が初期状態から拘束条件を破ることなく集合 $\mathcal{O}_{\infty 1} \cup \mathcal{O}_{\infty 2}$ に収束していることが確認できる。

5 複数のロボットシステム

本論文の枠組みの適用例として、複数のロボットシステムをハイブリッドシステムとして表現し、その最適制御について議論する。ここでは2次元平面で移動する複数のロボットシステムを、路面の変化を考慮してハイブリッドシステムとして表現する。このシステムの制御は上位と下位の制御構造で階層的に行なう。上位の制御として、障害物との衝突を回

避し目標位置に移動する最適制御問題の定式化を行なう。その最適制御問題から下位の制御器が追従するための目標値を生成する。この研究により、複数の制御対象が含まれるハイブリッドシステムの制御方法について明らかにする。

6 おわりに

本研究では、ハイブリッドシステムに対する有界な外乱を考慮したモデル予測制御について議論した。有界な外乱の加わるハイブリッドシステムに対して、外乱が存在しても、状態と入力拘束を破らないことと、状態が不変集合から構成される集合に収束することを保証する制御アルゴリズムを提案した。また、この枠組みの適用例として、複数の車両ロボットシステムに対する最適制御について研究した。

学位論文審査結果の要旨

平成17年1月25日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関係資料について検討を加え、同1月27日の口頭発表、第2回学位論文審査委員会において協議の結果、以下の通り判定した。

本論文は、区分的線形システムと論理混合型ハイブリッドシステムを対象として、これらのシステム表現の等価性を用いて、二つの制御モードを組み合わせたロバストモデル予測制御アルゴリズムを提案している。この提案アルゴリズムの特徴として、状態と入力に関する拘束条件が破られず、また状態が不変集合から構成される集合の中に収束することが示されている。さらに最適化手法に基づくオフライン計算を利用することにより、状態に関して区分的にアフィンな表現が可能となる制御側を明らかにしている。複数ロボットシステムをハイブリッドシステム表現し、障害物との衝突を回避し目標位置に移動する最適制御についても考察し、目標軌道の生成と追従制御も実現している。

本研究の成果は、不変集合の構成に深い考察を加えることにより、ハイブリッドシステムに対するロバストモデル予測制御を提案しており、価値の高いものである。

以上の内容を総合して、本論文は博士（工学）の学位を受けるのに値するものと判定する。